

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-234249

(43) 公開日 平成8年(1996)9月13日

(51) Int.Cl. <sup>5</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 2 F 1/35			G 0 2 F 1/35	
H 0 1 S 3/10			H 0 1 S 3/10	A
3/108			3/108	

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願平7-37199

(22) 出願日 平成7年(1995)2月24日

(71) 出願人 000004226

日本電信電話株式会社  
東京都新宿区西新宿三丁目19番2号

(72) 発明者 盛岡 敏夫

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日  
本電信電話株式会社内

(72) 発明者 森 邦彦

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日  
本電信電話株式会社内

(72) 発明者 猿渡 正俊

東京都千代田区内幸町1丁目1番6号 日  
本電信電話株式会社内

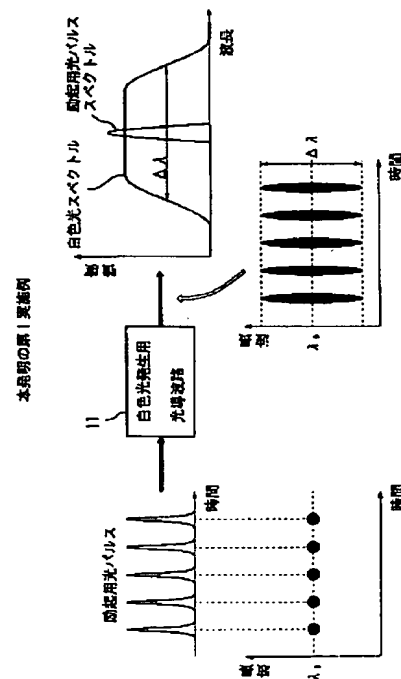
(74) 代理人 弁理士 古谷 史旺

(54) 【発明の名称】 コヒーレント白色光源

(57) 【要約】

【目的】 複雑なスペクトル構造をもたず、一様で連続的なスペクトルを有する超広帯域で高いコヒーレンスを有する白色パルスを生起させることができるコヒーレント白色光源を実現する。

【構成】 波長 $\lambda_0$ を含む所定の波長範囲 $\Delta\lambda$ で長さが $\ln G_0 / (2 |\gamma| P)$ 以上であり、分散スロープの絶対値が $16 (|\gamma| E) / (\Delta\lambda^2 \ln G_0)$ 以下であり、かつ波長 $\lambda_0$ での分散の絶対値が $(16 / \pi c) \cdot \lambda_0^2 |\gamma| P / (\Delta\lambda)^2$ 以下である光導波路と、この光導波路に波長 $\lambda_0$ の励起用光パルスを入力する手段とを備える。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光導波路の 3 次非線形係数を  $\gamma$ 、励起用光パルスの 1 パルス当たりのエネルギーを  $E$ 、光導波路中の励起用光パルスのピークパワーを  $P$ （光導波路に入力される励起用光パルスのピークパワーを  $P_0$  としたとき  $P = \alpha P_0$ 、 $\alpha$  は補正係数）、4 光波混合光強度の利得を  $G_0$ （ $G_0$  は 2 以上）、真空中の光速を  $c$  としたときに、波長  $\lambda_0$  を含む所定の波長範囲  $\Delta\lambda$  で長さが  $\ln G_0 / (2 |\gamma| P)$  [km]

以上であり、分散スロープの絶対値が

$$16 (|\gamma| E) / (\Delta\lambda^2 \ln G_0) \quad [\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}]$$

以下であり、かつ波長  $\lambda_0$  での分散の絶対値が

$$(16/\pi c) \cdot \lambda_0^2 |\gamma| P / (\Delta\lambda)^2 \quad [\text{ps}/\text{nm}/\text{km}]$$

以下である光導波路と、

前記光導波路に波長  $\lambda_0$  の励起用光パルスを入力する手段とを備えたことを特徴とするコヒーレント白色光源。

【請求項 2】 請求項 1 に記載のコヒーレント白色光源において、

励起用光パルスは光導波路に対して  $N$  次のソリトン光であり、補正係数  $\alpha$  が  $1.2N$  であることを特徴とするコヒーレント白色光源。

【請求項 3】 請求項 1 に記載のコヒーレント白色光源において、

光導波路の波長  $\lambda_0$  における分散の絶対値が伝搬方向に減少し、光導波路の白色光発生領域の分散の最大値を  $D_{\max}(\lambda_0)$  とし、分散の最小値を  $D_{\min}(\lambda_0)$  としたときに、補正係数  $\alpha$  が  $|D_{\max}(\lambda_0) / D_{\min}(\lambda_0)|$  であり、 $D_{\max}(\lambda_0) \cdot \gamma > 0$  かつ  $D_{\min}(\lambda_0) \cdot \gamma > 0$  であることを特徴とするコヒーレント白色光源。

【請求項 4】 請求項 3 に記載のコヒーレント白色光源において、

光導波路の波長  $\lambda_0$  における分散の絶対値が伝搬方向に単調減少することを特徴とするコヒーレント白色光源。

【請求項 5】 請求項 1 に記載のコヒーレント白色光源において、

励起用光パルスは光導波路の分散が励起用光パルスの波長で常分散の場合はレッドシフトチャープングを有する光パルスであり、光導波路の分散が励起用光パルスの波長で異常分散の場合はブルーシフトチャープングを有する光パルスであり、励起用光パルスのパルス幅、スペクトル幅を  $\Delta t_0$ 、 $\Delta\lambda$  としたときに補正係数  $\alpha$  が  $9.1 \Delta t_0 \cdot \Delta\lambda$  以下であることを特徴とするコヒーレント白色光源。

【請求項 6】 請求項 1 に記載のコヒーレント白色光源において、

光導波路に励起用光パルスを入力する手段に光増幅器を含む構成であることを特徴とするコヒーレント白色光源。

【請求項 7】 請求項 1 に記載のコヒーレント白色光源において、

光導波路の出力端に、光導波路の分散を補償する分散補償手段を接続した構成であることを特徴とするコヒーレント白色光源。

【請求項 8】 請求項 1 に記載のコヒーレント白色光源において、

光導波路の出力端に、出力される励起用光パルスを除去する帯域除去フィルタを接続した構成であることを特徴とするコヒーレント白色光源。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、励起用光パルスの波長の両側に超広帯域のコヒーレント白色光を発生させるコヒーレント白色光源に関する。

## 【0002】

【従来の技術】 超広帯域の白色光を発生させる従来方法として、種々の非線形光学媒質をピコ秒～フェムト秒の超短光パルスで励起し、3 次の非線形光学効果の複合効果によりその光スペクトルを飛躍的に広げる方法が知られている。非線形光学媒質としては、キセノンなどの気体、 $\text{CS}_2$ 、 $\text{D}_2\text{O}$ 、 $\text{CCl}_4$ などの液体、ガラス、光ファイバ、半導体などの固体等、種々のものが用いられる (P. L. Baldeck, R. Alfano, "Intensity effects on the stimulated four-photon spectra generated by picosecond pulses in optical fibers", J. of Lightwave Tech., LT-5, pp. 1712-1715, 1987)。

【0003】 非線形光学媒質として多モード光ファイバを用いた構成により得られた白色光スペクトルは、図 10 に示すように断続的で複雑な内部構造をもち、発生した波長範囲において滑らかで一定のスペクトル強度になっていなかった。さらに、発生には 100W 程度以上の励起パワーが必要であり、発生用光源として固体レーザなどの高出力大型レーザ（繰返し周波数 100MHz 程度）を用いざるを得なかった。したがって、ギガ Hz 以上の高繰返し周波数を必要とする通信用の光源には適用できなかった。

【0004】 また、発生した白色パルスのコヒーレンス性が劣っているので、白色スペクトルから一部の波長成分を光バンドパスフィルタなどの波長選択手段で抜き出しても、パルス幅がバンド幅のフーリエ変換で決まる最小のパルス幅を有するトランスフォームリミット (TL) パルスを得ることができなかった。具体的には、文献 (① R. Dorsinville, et al., "Generation of 3-ps pulses by spectral selection of the continuum generated by a 25-ps second harmonic Nd:YAG laser pulse in a liquid", Applied Opt., 27, pp. 16-18, 1988, ② M. N. Islam, et al., "Broad bandwidths from frequency-shifting solitons in fibers", Opt. Lett., 14, p. 370-372, 1989) に述べられているように、得られた白色パルスの時間帯域幅積（パルス幅とスペクトル幅の積）は TL パルスに対応する最小値に比べてその数倍か

ら10倍に達している。これは、一定のパルス幅に対してバンド幅が数倍から10倍も必要であることを意味し、分散の影響を受ける光ファイバ通信光源へ白色パルスを適用することは困難であった。

#### 【0005】

【発明が解決しようとする課題】従来方法による白色パルスが複雑なスペクトル構造をもつこと、大きな励起パワーを必要とすること、コヒーレンス性が低いことは、3次の非線形光学効果として主に誘導ラマン散乱と自己位相変調、相互位相変調や高次の空間横モード間の位相整合を用いた4光波混合との複合効果を利用していることに起因している。

【0006】これらの白色パルスの発生メカニズムは次の通りである。まず、励起光の波長から媒質固有のラマンシフト量だけずれた波長を中心にしてラマン光が発生する、もしくは高次の横モード間の位相整合により励起光の波長を中心にして多数の4光波混合成分が発生する。励起光パワーをさらに増加すると、これら新しく発生したスペクトル成分が十分成長した後に、それぞれが自己位相変調、相互位相変調によりさらに広がり励起光とこれらの成分のスペクトルは互いに重なりあって白色光となる。このとき発生したスペクトルは複雑な形状となり、必要となる励起光パワーはラマン散乱、4光波混合、自己位相変調、相互位相変調が複合しているために大きくなる。また、白色光スペクトルは自己位相変調、相互位相変調により複雑な位相変調を受けるので各波長成分の位相関係は乱れ、その結果コヒーレンス性が劣化する。

【0007】したがって、従来技術では連続的で滑らかなスペクトル構造を有し、高いコヒーレンスをもった白色パルスは得られず、その応用も大型レーザを使用した実験室での分光評価その他に限られていた。本発明は、複雑なスペクトル構造をもたず、一様で連続的なスペクトルを有する超広帯域で高いコヒーレンスを有する白色パルスを低励起パワーで発生させることができるコヒーレント白色光源を提供することを目的とする。

#### 【0008】

【課題を解決するための手段】本発明は、波長 $\lambda_0$ を含む所定の波長範囲 $\Delta\lambda$ で長さが $\ln G_0 / (2|\gamma|P)$ 以上であり、分散スロープの絶対値が $16(|\gamma|E) / (\Delta\lambda^2 \ln G_0)$ 以下であり、かつ波長 $\lambda_0$ での分散の絶対値が $(16/\pi c) \cdot \lambda_0^2 |\gamma| P / (\Delta\lambda)^2$ 以下である光導波路と、この光導波路に波長 $\lambda_0$ の励起用光パルスを入力する手段とを備える（請求項1）。ここで、 $\gamma$ は光導波路の3次非線形係数、 $E$ は励起用光パルスの1パルス当たりのエネルギー、 $P$ は光導波路中の励起用光パルスのピークパワー（光導波路に入力される励起用光パルスのピークパワーを $P_0$ としたとき $P = \alpha P_0$ 、 $\alpha$ は補正係数）、 $G_0$ は4光波混合光強度の利得で2以上（最適値は自然対数 $e$ ）、 $c$ は真空中の光速である。

【0009】励起用光パルスは光導波路に対してN次のソリトン光であり、 $\alpha = 1.2N$ である（請求項2）。光導波路の波長 $\lambda_0$ における分散の絶対値が伝搬方向に減少し、光導波路の白色光発生領域の分散の最大値を $D_{\max}(\lambda_0)$ とし、分散の最小値を $D_{\min}(\lambda_0)$ としたときに、補正係数 $\alpha$ が $|D_{\max}(\lambda_0) / D_{\min}(\lambda_0)|$ であり、 $D_{\max}(\lambda_0) \cdot \gamma > 0$ かつ $D_{\min}(\lambda_0) \cdot \gamma > 0$ である（請求項3）。

【0010】また、光導波路の波長 $\lambda_0$ における分散の絶対値が伝搬方向に単調減少する（請求項4）。励起用光パルスは光導波路の分散が励起用光パルスの波長で常分散の場合はレッドシフトチャープピングを有する光パルスであり、光導波路の分散が励起用光パルスの波長で異常分散の場合はブルーシフトチャープピングを有する光パルスであり、励起用光パルスのパルス幅、スペクトル幅を $\Delta t_0$ 、 $\Delta\nu$ としたときに補正係数 $\alpha$ が $9.1 \Delta t_0 \cdot \Delta\nu$ 以下である（請求項5）。

【0011】光導波路の出力端に、光導波路に励起用光パルスを入力する手段に光増幅器を含む構成である（請求項6）。光導波路の出力端に、光導波路の分散を補償する分散補償手段を接続した構成である（請求項7）。光導波路の出力端に、出力される励起用光パルスを除去する帯域除去フィルタを接続した構成である（請求項8）。

#### 【0012】

【作用】本発明のコヒーレント白色光源における白色光発生原理について、図2を参照して説明する。光導波路中に入力された励起用光パルスは、自己位相変調によりそのスペクトル幅が励起波長の両側に対称に広がる

(①)。自己位相変調によるスペクトル広がりが4光波混合の帯域に重なり始めると、自己位相変調によって広がったスペクトル成分を種にして、4光波混合の利得曲線②に沿ってスペクトルがその利得帯域幅までコヒーレントに広がり始める(③)。そして、しだいに励起光パワーが減少して励起光パワーの平方根に比例する利得帯域幅が減少し始めると、その時点でスペクトル広がりが停止する。

【0013】このとき発生した白色光スペクトルは、その発生過程から明らかなように励起波長の両側に徐々に広がっていくので連続的で一様となる。また、発生した白色パルスのコヒーレンスは、4光波混合光が発生する際の励起用光パルスのコヒーレンスにより決まり、励起用光パルスにコヒーレンスの高いパルスを用いれば白色光のコヒーレンスも高くなる。さらに、4光波混合の種となるスペクトル成分を発生する自己位相変調は低励起パワーで起こり、また一定の利得帯域を与える4光波混合の必要励起パワーは分散に比例して減少するので、低分散の光導波路を用いれば励起パワーの低減化も可能である。

【0014】また、光導波路にその分散の絶対値が伝搬

方向に徐々に（できれば単調に）減少するものを用いれば、励起用光パルスはコヒーレンスを保持しながら断熱パルス圧縮が起こってピーク値が増加する。これにより、ピーク値の平方根に比例し、分散値の平方根に逆比例する 4 光波混合の利得帯域は図 2 (2) の④に示すように一挙に広がり、発生する白色パルスの帯域も飛躍的に増加する（請求項 3、4）。

【0015】また、光導波路の分散に合わせて励起用光パルスのチャージングを設定することにより、光導波路の分散によるチャージングが補償され、パルスを圧縮することができる（請求項 5）。励起用光パルスを増幅して光導波路に入力することにより、発生する白色光の帯域を広げることができる（請求項 6）。

【0016】光導波路の出力端に分散補償手段を接続することにより、光導波路の分散により生じた白色光のチャージングを補償することができる（請求項 7）。光導波路の出力端に帯域除去フィルタを接続することにより、白色光から強い励起用光パルスのみを除去することができる（請求項 8）。以上示したように、本発明のコヒーレント白色光源は、単一モード光導波路中における励起用光パルスの自己位相変調、相互位相変調、ならびに広い波長範囲にわたる高効率でコヒーレントな光パラ

$$\Omega_S = (2|\gamma|P/\beta_2)^{1/2} \quad [\text{THz}] \quad \dots(1)$$

となる。また、光導波路の長さを  $L$  [km] とすると、 $G_0 = \exp(2|\gamma|PL)$

で与えられる。

【0019】ここで、白色光が連続的に発生するためには、 $\Omega_S$  において利得をもつ必要があるので、式 (2) の  $L_C = \ln G_0 / (2|\gamma|P)$

と求まる。

【0020】ところで、波長  $\lambda_0$  の励起用光パルスと波長  $\lambda_0 \pm \Delta\lambda/2$  の 4 光波混合光の光導波路長  $L_C$  にお

$$\begin{aligned} \tau &= (1/2) |dD(\lambda_0)/d\lambda| \cdot (\Delta\lambda/2)^2 \cdot L_C \\ &= (\ln G_0 / 16) |dD(\lambda_0)/d\lambda| \cdot \Delta\lambda^2 / (|\gamma|P) \end{aligned} \quad \dots(4)$$

と表せる。ここで、波長  $\lambda_0 \pm \Delta\lambda/2$  の 4 光波混合光が発生するためには、励起用光パルスと 4 光波混合光との時間的な重なりが必要で、それは両者の群遅延差  $\tau$  が励

$$\Delta t_0 \geq \tau = (\ln G_0 / 16) |dD(\lambda_0)/d\lambda| \cdot \Delta\lambda^2 / (|\gamma|P) \quad \dots(5)$$

で表される。したがって、分散スロープの条件として

$$|dD(\lambda_0)/d\lambda| \leq 16 (|\gamma|P \Delta t_0) / (\Delta\lambda^2 \ln G_0) \quad \dots(6)$$

が得られる。ここで、 $P \Delta t_0$  は励起用光パルスのエネルギー  $E$  にほぼ等しいので、光導波路の分散スロープに関

$$|dD(\lambda_0)/d\lambda| \leq 16 (|\gamma|E) / (\Delta\lambda^2 \ln G_0) \quad \dots(7)$$

が得られる。

【0021】次に、光導波路が波長  $\lambda_0$  の励起用光パルスから波長  $\lambda_0 \pm \Delta\lambda/2$  の 4 光波混合光を発生させるた

$$\Omega_S = (2|\gamma|P/\beta_2)^{1/2} \geq 2\pi c \Delta\lambda / (4\lambda_0^2) \quad \dots(8)$$

でなければならない。ここで、 $\beta_2$  と  $D(\lambda)$  の関係式

$$|\beta_2| = \lambda^2 |D(\lambda)| / (2\pi c) \quad \dots(9)$$

を用いて、光導波路の分散に関する条件式

メトリック 4 光波混合を用いて、励起光波長の両側の広い波長範囲で様なスペクトル強度と高いコヒーレンス（可干渉性）を有する超広帯域白色パルスを低励起パワーで発生させることができる。

【0017】

【実施例】

（第 1 実施例）図 1 は、本発明の第 1 実施例を示す。図において、分散スロープと分散の大きさが規定されている白色光発生用光導波路 11 に中心波長  $\lambda_0$  の励起用光パルスを入力すると、パルス性を保ちながら波長  $\lambda_0$  を中心にして  $\Delta\lambda$  の波長範囲の白色パルスが出力される。

【0018】以下、白色光発生用光導波路 11 の分散スロープと分散の大きさに関する規定を導出する。4 光波混合の理論から、最大利得を与える励起光（波長  $\lambda_0$ ）と 4 光波混合光（波長  $\lambda_f$ ）との光角周波数差  $\Omega_S (= 2\pi c |1/\lambda_0 - 1/\lambda_f| : c$  は真空中の光速）は、光導波路の 3 次非線形係数を  $\gamma (= 2\pi n_2 / (\lambda A_{eff}) [1/(W \cdot km)] : n_2$  は光導波路の非線形屈折率  $[m^2/W]$ 、 $A_{eff}$  は光導波路の有効断面積  $[m^2]$ ）、光導波路中の励起用光パルスのピークパワーを  $P [W]$ 、光導波路の分散を  $\beta_2 [ps^2/km]$  とすると、

$$\Omega_S = (2|\gamma|P/\beta_2)^{1/2} \quad [\text{THz}] \quad \dots(1)$$

$G_0$  における 4 光波混合光強度の利得  $G_0$  は、 $G_0 = \exp(2|\gamma|PL)$

で与えられる。この条件より白色光発生に必要な光導波路長  $L_C$  は

群遅延差  $\tau [ps]$  は、分散スロープの絶対値を  $|dD(\lambda)/d\lambda| [ps/nm^2/km]$  として近似的に

励起用光パルスのパルス幅  $\Delta t_0 (ps : \text{半値全幅})$  以下であるという条件

$$\Delta t_0 \geq \tau = (\ln G_0 / 16) |dD(\lambda_0)/d\lambda| \cdot \Delta\lambda^2 / (|\gamma|P) \quad \dots(5)$$

$$|dD(\lambda_0)/d\lambda| \leq 16 (|\gamma|P \Delta t_0) / (\Delta\lambda^2 \ln G_0) \quad \dots(6)$$

する条件式

$$|dD(\lambda_0)/d\lambda| \leq 16 (|\gamma|E) / (\Delta\lambda^2 \ln G_0) \quad \dots(7)$$

めには、少なくとも式 (1) で与えられる利得帯域 ( $\propto \Omega_S$ ) が  $\Delta\lambda/4$  以上でなければならない。したがって、

$$\Omega_S = (2|\gamma|P/\beta_2)^{1/2} \geq 2\pi c \Delta\lambda / (4\lambda_0^2) \quad \dots(8)$$

$$|\beta_2| = \lambda^2 |D(\lambda)| / (2\pi c) \quad \dots(9)$$

$$|D(\lambda_0)| \leq (16/\pi c) \cdot \lambda_0^2 |\gamma| P / (\Delta \lambda)^2 \quad \dots(10)$$

が求まる。式(10)は、少なくとも式(3)で規定される長さ  $\ln G_0 / (2|\gamma|P)$  にわたって満たされなければならない。

【0022】なお、光導波路中の励起用光パルスのピークパワー  $P$  と、光導波路に入力される励起用光パルスのピークパワー  $P_0$  とは、励起用光パルスの波形変化等の

$$\Delta \lambda \leq 4 \cdot \{(\ln G_0 |\gamma| E) / |dD(\lambda_0)/d\lambda|\}^{1/2} \quad \dots(11)$$

となり、分散スロープの絶対値  $|dD(\lambda_0)/d\lambda|$  から白色光のスペクトル広がりを与える式が得られる。 $G_0 = e$  ( $\ln G_0 = 1$ ) として、通常の単一モード光ファイバを用いた場合の実験パラメータ  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$  [m<sup>2</sup>/W]、 $\gamma = 2.5$  [1/km]、分散スロープ  $0.07$  [ps/nm<sup>2</sup>/km]、励起用光パルスのエネルギー  $E = 7$  [pJ] (パルス幅  $\Delta t_0 = 3.5$  [ps]、ピークパワー  $2$  [W]) とすると、波長範囲  $\Delta \lambda < 63.2$  [nm] が求まる。これは、図3に示す実験結果 (白色光スペクトル) とよく一致している。

【0024】また、さらに分散スロープの小さい単一モ

$$N = T_0 \cdot \{(|\gamma|P) / |\beta_2|\}^{1/2} \quad \dots(12)$$

で与えられる。ここで、 $T_0$  は光導波路に入力される励起用光パルスのパルス幅である。上述した励起用光パルスのパルス幅  $\Delta t_0$  との関係は、ガウス型波形の場合は  $\Delta t_0 = 1.665 T_0$ 、sech<sup>2</sup> 波形の場合は  $\Delta t_0 = 1.76 T_0$  とな

$$F_C \equiv \Delta t_0 / t_C \approx 4.1 N$$

と近似され、光導波路中のピークパワー  $P$  は

$$P = F_C \cdot Q_C \cdot P_0$$

で表される。ここで、 $Q_C$  は圧縮されたソリトンパルスの品質を表す係数であり、全体のパルスエネルギーに占

$$P \approx 1.2 N \cdot P_0$$

となり、補正係数  $\alpha$  は  $1.2 N$  となる (請求項2)。

【0027】(第2実施例) 図5は、本発明の第2実施例を示す (請求項3、4)。図において、本実施例では白色光発生用光導波路として、長手方向に分散値が減少する分散分布型偏波保持光ファイバ12を用いる。分散分布型偏波保持光ファイバ12は、 $D(\lambda_0) \cdot \gamma > 0$  の条件の下で、光導波路中の波長  $\lambda_0$  における分散の絶対値  $|D(\lambda_0)|$  が白色光発生領域  $\Delta L (= L_1 \sim L_2)$  で

$$|D_{\max}(\lambda_0) / D_{\min}(\lambda_0)|$$

と求まる。ここで、励起用光パルスのエネルギーが保存

$$F_C = |D_{\max}(\lambda_0) / D_{\min}(\lambda_0)|$$

となり、光導波路中のピークパワー  $P$  は

$$P = |D_{\max}(\lambda_0) / D_{\min}(\lambda_0)| \cdot P_0 \quad \dots(18)$$

となるので、補正係数  $\alpha$  が  $|D_{\max}(\lambda_0) / D_{\min}(\lambda_0)|$  として求まる。

【0028】通常の光ファイバでは3次非線形係数  $\gamma$  の符号は正であるので、分散  $D(\lambda_0) > 0$  であることが必要となる。また、半導体媒質では  $\gamma$  の符号が負であるものも存在するが、その場合には分散  $D(\lambda_0) < 0$  であることが必要となる。本実施例のように分散の絶対値が減

ために一般に異なる。これらは補正係数  $\alpha$  を用いて、 $P = \alpha P_0$  と表すことができる。また、光導波路が光増幅媒質である場合には、補正係数  $\alpha$  はその光増幅度に等しい。

【0023】ところで、式(7)を変形すると、

一ド光ファイバを用いた場合の実験結果を図4に示す。この場合の実験パラメータ  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$  [m<sup>2</sup>/W]、 $\gamma = 4.0$  [1/km]、分散スロープ  $0.01$  [ps/nm<sup>2</sup>/km]、励起用光パルスのエネルギー  $E = 7$  [pJ] とすると、波長範囲  $\Delta \lambda < 211.7$  [nm] が求まり、これも実験結果とよく一致する。

【0025】また、 $D(\lambda_0) \cdot \gamma > 0$  の条件では、光導波路中を伝搬する励起用光パルスはソリトン光となる。なお、 $D(\lambda_0) < 0$  は常分散、 $D(\lambda_0) > 0$  は異常分散に対応し、例えば通常の光ファイバでは  $\gamma > 0$  である。ソリトン光の次数  $N$  は、

【0026】光導波路中では、一般に自己位相変調と分散との複合効果によりソリトン圧縮が起こり、圧縮されたソリトンパルス幅を  $\Delta t_C$  とすると、 $N > 10$  では

$$\dots(13)$$

$$\dots(14)$$

める圧縮されたパルスのエネルギーの比として与えられる。 $N = 10$  程度では  $Q_C \approx 0.3$  であり、式(14)は

$$\dots(15)$$

ゆっくりと平均的に減少する。 $\Delta L$  がソリトン長  $L_S = \pi T_0^2 / (2|\beta_2|)$  に比べて十分大きい場合に白色光発生領域でソリトン断熱圧縮が起こり、励起用光パルスはそのソリトン次数を保存したままパルス圧縮を起こす。圧縮比は、ソリトン次数  $N$  が一定である条件より、白色光発生領域における分散の最大値  $D_{\max}(\lambda_0)$  と最小値  $D_{\min}(\lambda_0)$  を用いて、

$$\dots(16)$$

されると仮定すると、式(13)に示す  $F_C$  は、

$$\dots(17)$$

少する光導波路を用いる場合の利点は、励起用光パルスの品質 (トランスフォームリミット性) を損なわずに光導波路中のピークパワー  $P$  を増大させ、結果的に式(1)で与えられる励起用光パルスの平方根に比例し分散  $D(\lambda_0)$  の平方根に反比例する4光波混合の利得幅を飛躍的に増大させることができることにある。さらに、光導波路中においても励起用光パルスはコヒーレンス性を

維持しているので、コヒーレンスのよい白色光を発生させることができる。

【0029】（第3実施例）図6は、本発明の第3実施例を示す（請求項5）。図において、本実施例は、パルス内で瞬时光周波数が変化するチャープングを有する励起用光パルスを光ファイバ13に入力することを特徴とする。すなわち、光ファイバ13の分散が常分散のとき（ $D(\lambda_0) < 0$ ）、レッドシフトチャープング（パルスの前側から後側にむけて瞬时光周波数が短波長側から長波長側に変化する）を有する励起用光パルスを用いる。このとき、光ファイバ13では長波長が短波長よりも群速度が速いのでレッドシフトチャープングは補償され、パルスは圧縮される。

【0030】また、光ファイバ13の分散が異常分散の

$$P = \Delta t_0 / \Delta t_c \cdot P_0 = 2.3 \Delta t_0 \cdot \Delta \nu \cdot P_0 \quad \cdots (19)$$

で与えられ、補正係数 $\alpha$ は  $2.3 \Delta t_0 \cdot \Delta \nu$  となる。ま

た、 $\text{sech}^2$  型の場合には、 $\Delta t_c = 0.315 / \Delta \nu$  [ps] で

$$P = \Delta t_0 / \Delta t_c \cdot P_0 = 3.2 \Delta t_0 \cdot \Delta \nu \cdot P_0 \quad \cdots (20)$$

で与えられ、補正係数 $\alpha$ は  $3.2 \Delta t_0 \cdot \Delta \nu$  となる。ま

た、ローレンツ型の場合には、 $\Delta t_c = 0.11 / \Delta \nu$  [ps]

$$P = \Delta t_0 / \Delta t_c \cdot P_0 = 9.1 \Delta t_0 \cdot \Delta \nu \cdot P_0 \quad \cdots (21)$$

で与えられ、補正係数 $\alpha$ は  $9.1 \Delta t_0 \cdot \Delta \nu$  となる。このように補正係数 $\alpha$ はパルス波形により変化するが、ここでは最大値をとって  $\alpha = 9.1 \Delta t_0 \cdot \Delta \nu$  とする。

【0032】（第4実施例）図7は、本発明の第4実施例を示す（請求項6）。図において、本実施例は、白色光発生用光導波路11の入力側に光増幅器14を接続し、励起用光パルスとして変調光パルスを入力することを特徴とする。変調光パルスを光増幅器14で増幅して白色光発生用光導波路11に入力すると、図のように変調された白色光が発生し、かつ白色光の波長範囲 $\Delta \lambda$ を広げることができる。この白色光からバンドパス光フィルタやアレイ導波路型光フィルタなどの光分波器を用いて所定の波長成分を分離することにより、光周波数変換回路として機能させることができる。

【0033】（第5実施例）図8は、本発明の第5実施例を示す（請求項7）。図において、本実施例は、白色光発生用光導波路11の出力端に、その分散を補償する分散補償媒質15を接続したことを特徴とする。なお、分散補償媒質15としては、光ファイバ、半導体や有機ポリマーなどの光導波路を用いることができる。

【0034】白色光発生用光導波路11から出力される白色光は、図8に示すように光導波路の群遅延特性を反映してチャープングを有しており、これを分散補償媒質15に入力してチャープングを補償する。この白色光はコヒーレントであるので、それを波長選択手段（バンドパス光フィルタやアレイ導波路型光フィルタなどの光分波器）を用いてフィルタリングすれば、光フィルタのバンド幅で決まるトランスフォームリミット光パルスを得ることができる。また、波長可変または多波長のピコ秒

とき（ $D(\lambda_0) > 0$ ）、ブルーシフトチャープング（パルスの前側から後側にむけて瞬时光周波数が長波長側から短波長側に変化する）を有する励起用光パルスを用いる。このとき、光ファイバ13では短波長が長波長よりも群速度が速いのでブルーシフトチャープングは補償され、パルスは圧縮される。このときの光ファイバ13の分散と励起用光パルス幅のファイバ長依存性を図6に示す。

【0031】光ファイバ13中で圧縮された励起用光パルスのパルス幅 $\Delta t_c$ は、入力される励起用光パルスのスペクトル幅を $\Delta \nu$  [THz] として、ガウス型の場合には  $\Delta t_c = 0.44 / \Delta \nu$  [ps] で表される。したがって、光ファイバ13中の励起用光パルスのピークパワー $P$ は、入力される励起用光パルスのパルス幅を $\Delta t_0$ として、

表されるので、

で表されるので、

からフェムト秒パルスを容易に一括して発生させることができる。

【0035】（第6実施例）図9は、本発明の第6実施例を示す（請求項8）。図において、本実施例は、白色光発生用光導波路11の出力端に帯域除去フィルタ16を接続したことを特徴とする。これにより、白色光から強い励起用光パルスのみを除去することができる。

【0036】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のコヒーレント白色光源は、複雑なスペクトル構造をもたず、一様で連続的なスペクトルを有し、超広帯域で高いコヒーレンスを有し、さらにGHzの繰返し周波数の白色パルスを低励起パワーで発生させることができる。

【0037】また、分散補償手段を用いてチャープングを補償することにより、コヒーレントな白色光を出力させることができる。この分散補償手段と波長選択手段とを組み合わせることにより、任意のパルス幅の波長可変または多波長のコヒーレントパルス光源を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施例を示す図。

【図2】本発明のコヒーレント白色光源における白色光発生原理を説明する図。

【図3】通常の単一モード光ファイバを用いたときの白色光スペクトルを示す図。

【図4】分散スロープの小さい単一モード光ファイバを用いたときの白色光スペクトルを示す図。

【図5】本発明の第2実施例を示す図。

【図6】本発明の第3実施例を示す図。

【図 7】 本発明の第 4 実施例を示す図。

【図 8】 本発明の第 5 実施例を示す図。

【図 9】 本発明の第 6 実施例を示す図。

【図 10】従来の白色光スペクトルを示す図。

【符号の説明】

## 1.1 白色光発生用光導波路

## 1.2 分散分布型偏波保持光ファイバ

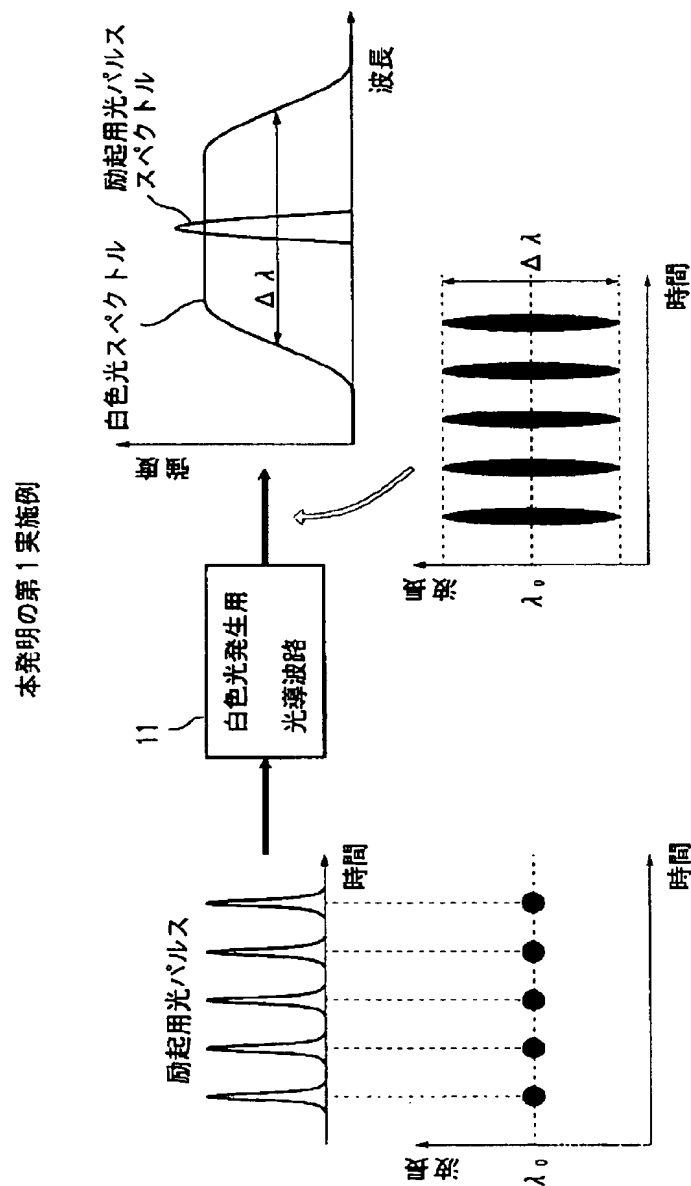
### 13 光ファイバ

## 14 光增幅器

## 15 分散補償媒質

## 16 帯域除去フィルタ

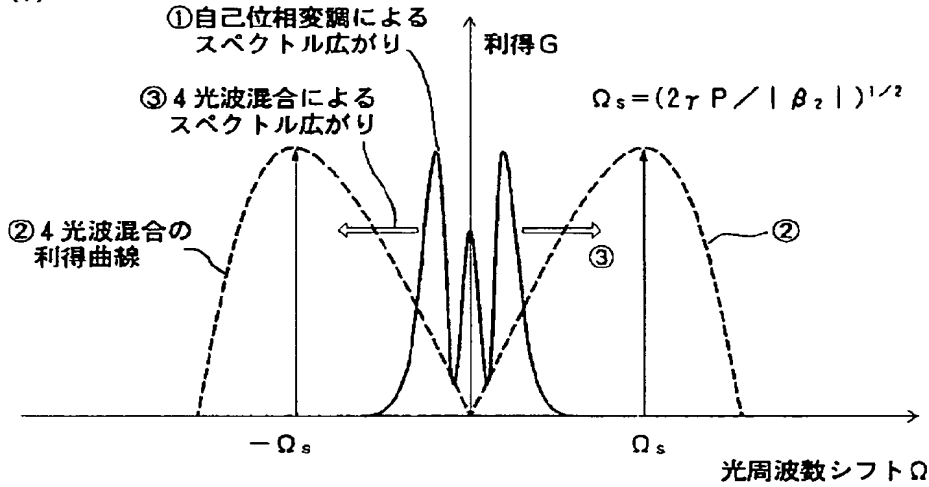
【图 1】



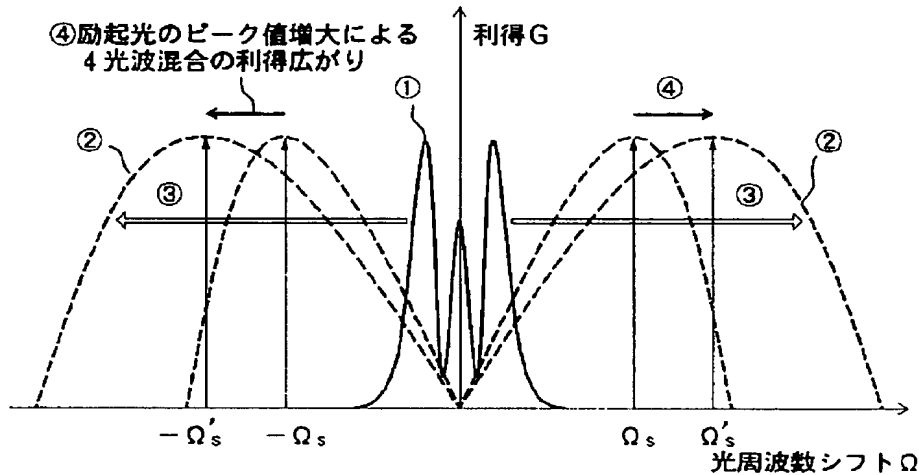
【図 2】

本発明のコヒーレント白色光源における白色光発生原理

(1)

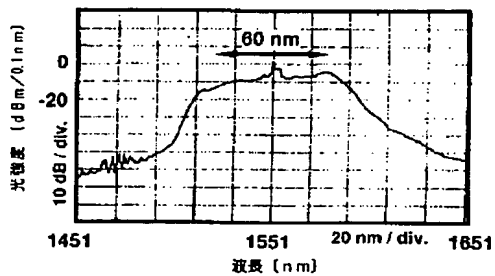


(2)



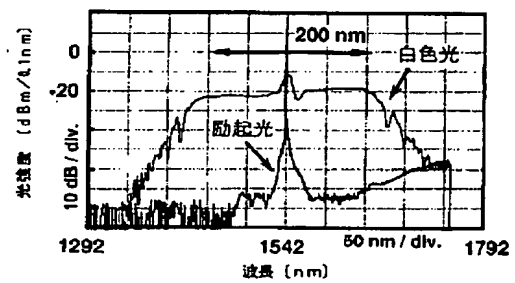
【図 3】

通常の単一モード光ファイバを用いたときの白色光スペクトル



【図 4】

分散スロープの小さい単一モード光ファイバを用いたときの白色光スペクトル

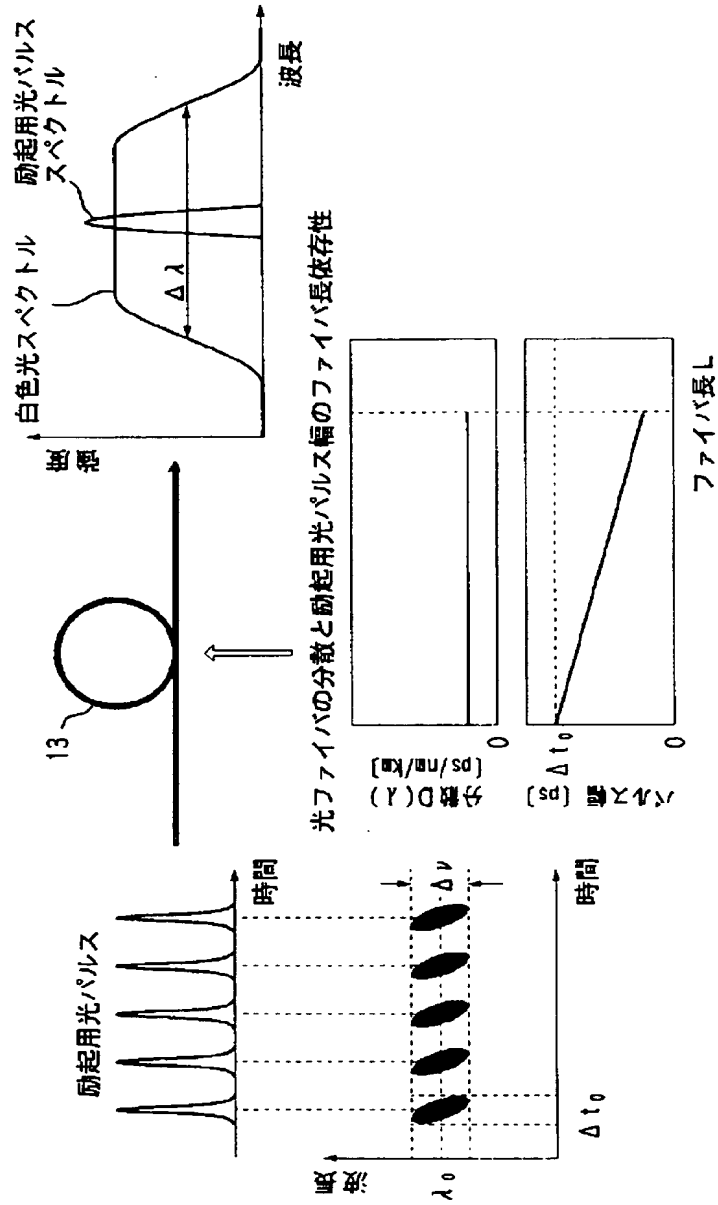




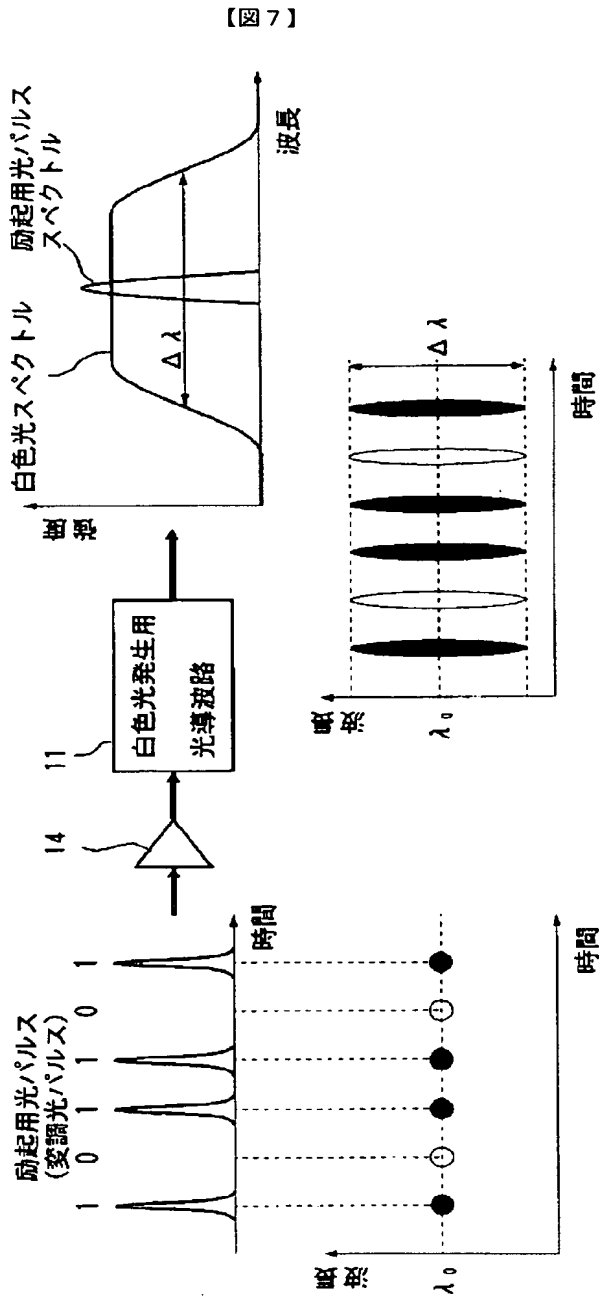


本発明の第3実施例

【図6】

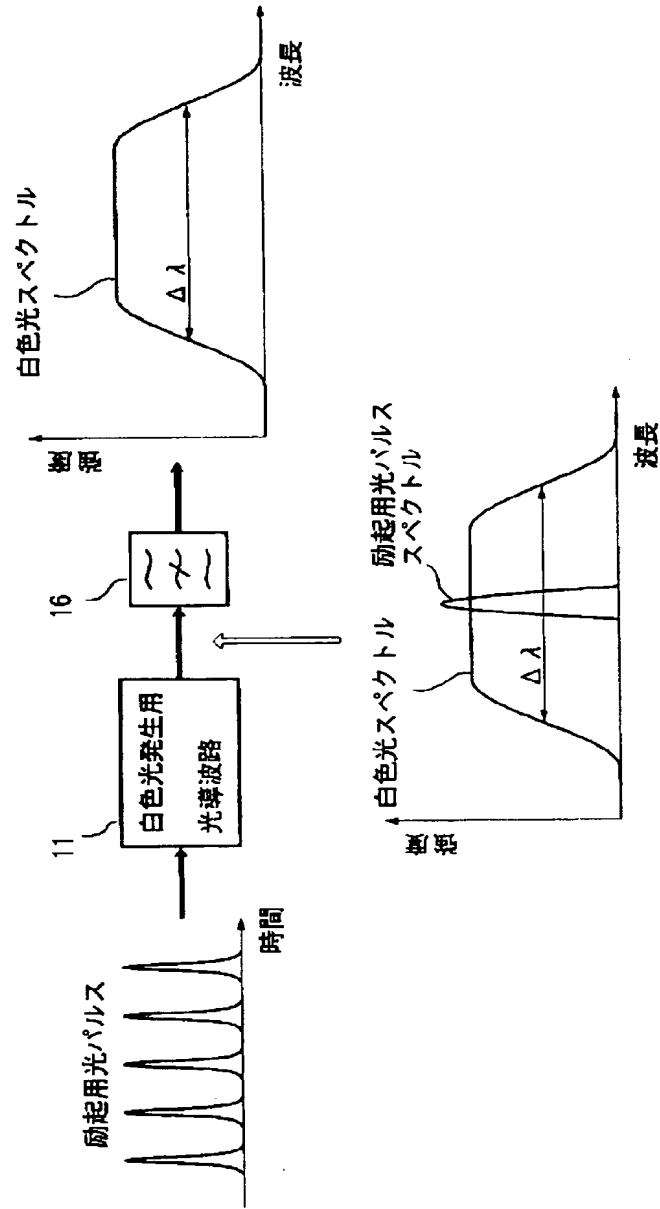


本発明の第 4 実施例





## 本発明の第 6 実施例



【図 9】

【図 10】

従来の白色光スペクトル

